



Машиностроение. – 2011. – 377 с.;

3. Компания АСКОН [Электронный ресурс] // Комплексные решения для машиностроения. – Режим доступа: <http://www.ascon.ru> – Проверено 23.02.2018;

4. Типовых нормативов времени на разработку конструкторской документации. ШИФР 13.01.01 (утв. Минтрудом России 07.03.2014 N 003).

И.Л. Ловчий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LABVIEW ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА ВДОЛЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО КОНТУРА МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

(АО «Научно-исследовательский институт
оптико-электронного приборостроения», г. Сосновый Бор)

Внедрение цифровых информационных технологий в процесс производства, преобразования и распределения электроэнергии сопровождается все более широким применением оптических методов и средств ее регистрации. При этом общей тенденцией развития оптико-электронной аппаратуры измерения электрического тока является использование оптоволоконных датчиков (ОВД) на основе магнитооптического эффекта Фарадея.

В типичной схеме поляризационного ОВД чувствительный элемент – одномодовое стекловолокно - образует замкнутый контур вокруг проводника с электрическим током. Линейно поляризованное излучение, прошедшее через светопровод, вследствие эффекта Фарадея меняет азимут своей поляризации на угол, равный произведению константы Верде материала стекловолокна на число волоконных витков и на величину протекающего через проводник тока. К сожалению, искривления светопровода в пространстве приводят к сложной поляризационной анизотропии стекловолокна вследствие многообразия возникающих упругих напряжений как по величине и направлению, так и по месту их расположения вдоль волокна. В результате проявление эффекта Фарадея в обычном одномодовом стекловолокне становится расплывчатым и малоинформативным для использования в измерительных целях. Поэтому в ОВД используются специальные световоды типа *twist* [1] или *spin* [2], отличающиеся как технологиями изготовления, так и поляризационными параметрами.

Подавляющее большинство современных ОВД тока используют волокно типа *spin*, изготавливаемое из заготовки с сильным встроенным линейным двулучепреломлением (ДЛП), которую вращают в процессе термической вытяжки волокна. В таком волокне упорядоченное внутреннее линейное ДЛП нивелирует влияние внешних упруго-оптических эффектов, возникающих при изгибах волокна в контуре, на состояние поляризации (СП) света на выходе световода и стабилизирует реакцию датчика. При этом параметры датчика (чувствительность, линейность характеристики, стабильность отклика) зависят от величины встроенного ДЛП, величины продольной закрутки осей ДЛП, величины тока,



размеров и ориентации чувствительного волоконного контура в пространстве относительно вектора поляризации на входе световода. Моделируя влияние того или иного фактора на выходное СП света, варьируя различные алгоритмы обработки измерительных сигналов датчика с выхода анализатора – поляризационного делителя, можно заранее определить оптимальные характеристики используемого *spin* волокна для получения необходимых параметров датчика в конкретных условиях измерения тока [4].

Для исследования процесса поляризационного преобразования света при прохождении его вдоль световода использовался формализм сферы Пуанкаре [3] – представление СП в виде точки на единичной сфере с координатами долготы и широты, равными удвоенным значениям азимута φ и угла эллиптичности ε поляризации. Состояние поляризации после прохождения произвольной фазовой пластины определяется вращением на сфере начального положения поляризации на угол двулучепреломления, равный углу сдвига фаз ортогонально поляризованных компонент, вокруг проходящей через центр сферы быстрой оси двулучепреломления (оптической оси фазовой пластины). Численно координаты СП света (x' , y' , z') находятся из произведения матрицы поворота (на угол β вокруг оси ДЛП с направляющим вектором (X, Y, Z)) на радиус-вектор точки начального состояния (x, y, z) :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^2 + (Y^2 + Z^2)\cos\beta & XY - XY\cos\beta - Z\sin\beta & XZ - XZ\cos\beta + Y\sin\beta \\ XY - XY\cos\beta + Z\sin\beta & Y^2 + (X^2 + Z^2)\cos\beta & YZ - YZ\cos\beta - X\sin\beta \\ XZ - XZ\cos\beta - Y\sin\beta & YZ - YZ\cos\beta + X\sin\beta & Z^2 + (X^2 + Y^2)\cos\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $x = \cos(2\varphi)\cos(2\varepsilon)$, $y = \sin(2\varphi)\cos(2\varepsilon)$, $z = \sin(2\varepsilon)$.

Поляризационные параметры света на выходе волокна определялись исходя из пошаговой трансформации исходного линейного СП при последовательном прохождении малых локальных участков всего световода. Для этого *spin* световод представлялся в виде чередующихся последовательностей предельно тонких сегментов – линейных (обусловленных встроенным и наведенными внешне упруго-оптическими эффектами) и циркулярных (обусловленных эффектом Фарадея) фазовых пластин. Углы сдвига фаз и положения оптических осей линейных пластин вдоль волокна определялись параметрами *spin* волокна (величина встроенного ДЛП и величина закрутки при вытяжке) и размерами и ориентацией чувствительного контура датчика относительно вектора начальной поляризации, локальная величина циркулярного двулучепреломления определялась распределением магнитного поля проводника с током вдоль контура.

В среде LabVIEW чувствительный контур датчика представлялся в виде виртуального прибора (VI «SPUN»), на вход которого подавались: начальное положение поляризации (φ_0 , ε_0), параметры *spin* волокна (длина L_β биений двулучепреломления и шаг L_τ закрутки волокна), радиус R чувствительного световодного контура, начальное положение оси внутреннего ДЛП и ориентация плоскости чувствительного контура относительно вектора поляризации входного излучения, величина тока в проводнике и относительное распределение



наведенного током магнитного поля вдоль чувствительного контура ВОД. С выхода прибора поступала информация о траектории изменения СП вдоль всего контура (при необходимости - с графическим представлением результатов для визуального анализа), конечные положения СП и оси встроенного ДЛП. Комбинация двух приборов VI «SPUN» с некоторым преобразованием промежуточной информации позволяла моделировать реальный двухпроходовой ВОД с обратным зеркальным вводом излучения в волокно.

На рис. 1 на сфере Пуанкаре представлена эволюция СП распространяющегося вдоль волокна изначально линейно поляризованного света. Точки экватора сферы Н и V соответствуют линейным состояниям поляризации с горизонтальным и вертикальным направлениями вектора поляризации, полюса сферы R и L – право- и левовращательным состояниям поляризации. При начальном положении оси ДЛП *spin* волокна $\pm 45^\circ$ СП периодически отклоняется от экватора на угол $\pm \chi$:

Р и L – право- и левовращательным состояниям поляризации. При начальном положении оси ДЛП *spin* волокна $\pm 45^\circ$ СП периодически отклоняется от экватора на угол $\pm \chi$:

$$\chi = \arctan(L_\tau/2L_\beta), \quad (2)$$

с периодом колебаний T , достаточно точно удовлетворяющим эмпирическому выражению:

$$T = \pi(L_\tau/2L_\beta) \sin \chi \sqrt{\cos \chi}. \quad (3)$$

При ином начальном положении оси ДЛП колебательная кривая («змейка») искажается по форме и смещается от экватора к одному из полюсов. Искажение волокна в пространстве (например, при формировании измерительного контура) приводит к добавочным возмущениям траектории СП в виде наложения дополнительных колебаний относительно экватора всей «змейки» в целом.

В качестве примера, на рис.2 на развертке участка поверхности сферы Пуанкаре представлены траектории изменений координат СП света на десяти %-ном отрезке первого витка контура из 16 витков радиусом $R = 10$ мм из кварцевого *spin* волокна со следующими параметрами: $L_\beta = 4,39$ мм (на длине волны $\lambda = 660$ нм), $L_\tau = 3,33$ мм, для начального положения оси встроенного двулучепреломления 0° (кривая 1) и 45° (кривая 2) и ориентации плоскости контура под углом 45° относительно вектора входной поляризации. Выделенные отрезки, примыкающие к концам кривых, отражают изменения координат СП при пропуске сквозь контур датчика пилообразного электрического тока амплитудой ± 50 кА.

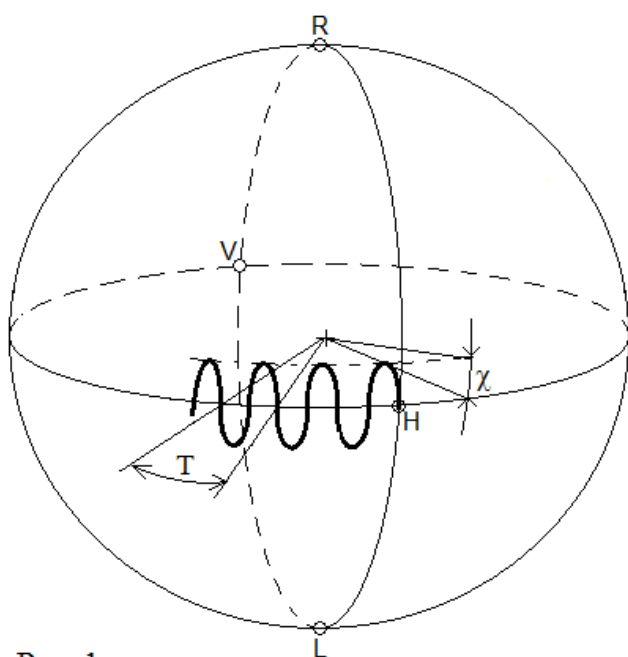


Рис. 1.

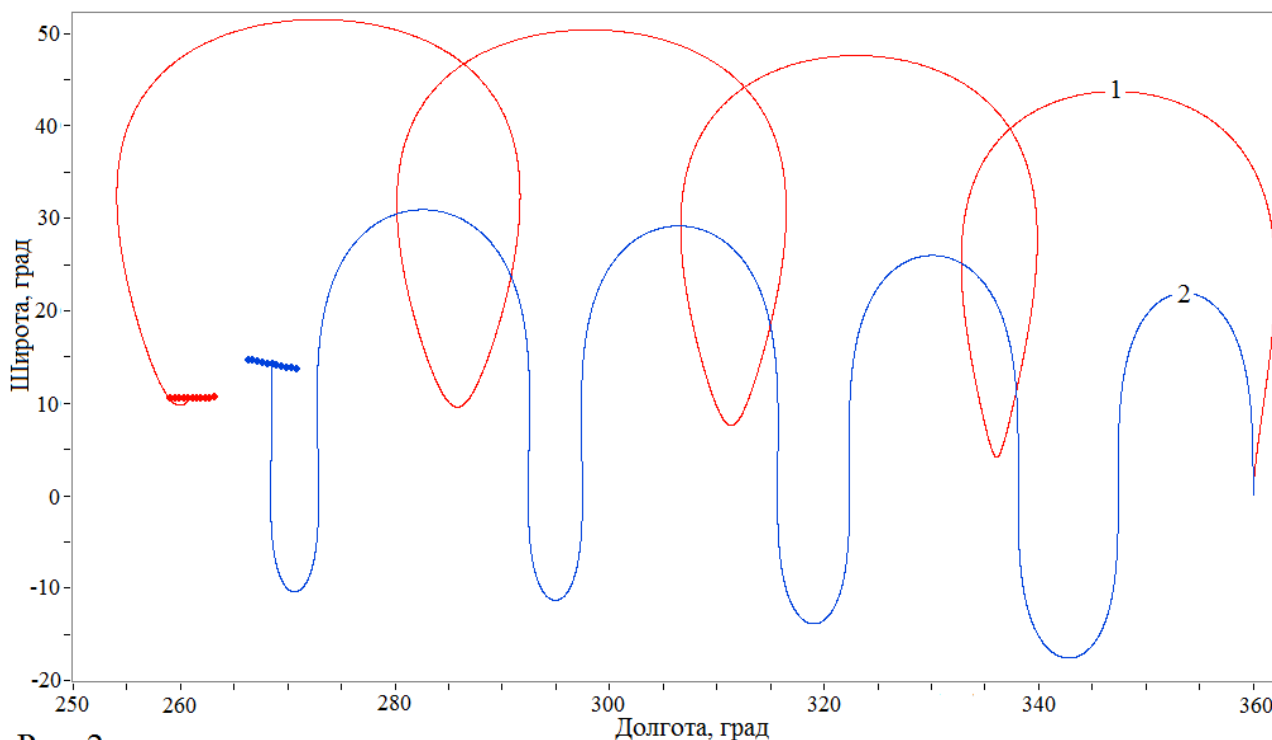


Рис. 2.

Анализ СП света на выходе двухпроходного ВОД с компенсатором взаимной оптической анизотропии позволил вывести некоторые закономерности чувствительности датчика, подтвержденные экспериментально на макетном образце датчика [4]. Так, при малых токах и небольших изгибах волокна чувствительность удовлетворяет выражению:

$$\eta = (\cos \chi)^2 \quad (4)$$

При сильных изгибах (например, при намотке волокна в катушку с малым радиусом для увеличения числа витков в чувствительном контуре) отклик датчика становится неустойчивым, зависящим от ориентации контура, и общая чувствительность определяется выражением:

$$\eta \pm \Delta \eta = (\cos \chi)^2 \pm 2\delta \cos \chi \sin \chi, \quad (5)$$

где коэффициент δ зависит от соотношения наведенного изгибом и встроенного ДЛП, а также от уровня закрутки осей последнего. Для плавленого кварца на длине волны 660 нм $\delta \approx 0,005(L_\beta)^2/(R^2 L_\tau)$, для типичных величин L_β и L_τ (порядка нескольких мм, причем $L_\tau \leq L_\beta$) заметные колебания чувствительности (на уровне $\sim 1\%$ и более) проявляются при радиусах изгиба волокна менее $2 \div 3$ см. Уменьшение L_β приводит к повышению устойчивости отклика датчика к искривлениям волокна в пространстве, увеличение соотношения L_β/L_τ – к повышению чувствительности датчика.

При больших токах чувствительность ВОД падает и для адекватного измерения тока необходимо использовать поправочную кривую.



Литература

1. Ulrich R., Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers // Appl. Opt. 1979. V.18, №13, P.2241-2251.
2. Laming R.I., Payne D.N. Electric current sensor employing spun highly birefringent optical fibers // J. Lightw. Technol. 1989. V.7, №12, P.2084-2094.
3. Шерклифф У. Поляризованный свет. Пер. с англ. М.: Мир, 1965. 264 с.
4. Ловчий И.Л. Численное моделирование и исследование поляризационного датчика тока со световодом типа *spun* // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 12, С. 25-33.

В.В. Любимов, Д.Д. Бобылёв

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РУНГЕ-КУТТЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ БОРТОВЫХ МИКРОУСКОРЕНИЙ МИКРОСПУТНИКА НА БОЛЬШИХ ИНТЕРВАЛАХ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

(Самарский университет)

Постановка задачи

Рассматривается задача о математическом моделировании относительно-го движения микроспутника по круговой околоземной орбите. В качестве силовых факторов, действующих на спутник в его движении относительно центра масс, учитываются гравитационный и аэродинамический моменты [1-8]. При численном интегрировании системы уравнений движения микроспутника применяется семиэтапный метод Рунге-Кутты. Производится сравнение результатов численного интегрирования величин бортовых микроускорений при использовании семиэтапного и четырехэтапного явных методов Рунге-Кутты. В семиэтапном методе используется формула Дормана-Принса. Четырехэтапный метод является классическим, и в дальнейшем будем использовать общепринятое сокращенное название РК4.

Явный семиэтапный метод Рунге-Кутты

Семейство явных одношаговых методов Рунге-Кутты задается формулами [9]:

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^s b_i k_i,$$

где h – величина шага интегрирования. Здесь вычисление нового значения проходит в s этапов:

$$k_1 = hf(x_n, y_n),$$

$$k_2 = hf(x_n + c_2 h, y_n + a_{21} k_1),$$

...

$$k_s = hf(x_n + c_s h, y_n + a_{s1} k_1 + a_{s2} k_2 + \dots + a_{s,s-1} k_{s-1}).$$